

Разработка автоматических раскрываемых СВЧ антенн для спутников CubeSat

И. В. Малыгин, А. С. Карамышев✉, С. С. Блинов

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Екатеринбург, Россия,
✉ askaramysh@yandex.ru

Аннотация

В настоящее время спутники CubeSat передают очень мало информации. Поскольку CubeSat являются малыми спутниками, они не могут иметь большие антенны. Для повышения пропускной способности необходимо использовать более высокие частоты и направленные антенны. В данной работе проводится сравнение трансформируемых антенн и полуволновых диполей при их использовании в качестве антенной системы CubeSat, приводится несколько типов автоматических раскрываемых СВЧ антенн, исследуется возможность их использования для спутников CubeSat.

Ключевые слова

CubeSat, трансформируемая антенна, раскрываемая антенна, расчет параболической антенны, рефлектор, радиоотражающая поверхность, лепесковая антенна, зонтичная антенна

Для цитирования

Малыгин И. В., Карамышев А. С., Блинов С. С. Разработка автоматических раскрываемых СВЧ антенн для спутников CubeSat. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(1):30–42. DOI: 10.15826/urej.2019.3.1.002

The development of automatic expandable microwave antennas for CubeSat satellites

I. V. Malygin, A. S. Karamyshev✉, S. S. Blinov

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia,
✉ askaramysh@yandex.ru

Abstract

In recent years CubeSat satellites transmit very insignificant amount of information. Since CubeSats are small satellites, they cannot have large antennas. CubeSat project engineers still use half-wave dipoles as the main antenna despite the evolution of communication systems. It is

necessary to use higher frequencies and directional antennas to increase the bandwidth. Moreover, the use of the directional parabolic antennas reduces the radiation power of the CubeSat transmitter, increasing the lifetime of the satellite. This paper includes the comparison of transformable antennas and half-wave dipoles in the case of using them as the CubeSat antenna system. Various types of automatic disclosed microwave antennas are given. The possibility of the transformable antennas use for the CubeSat satellites is investigated.

Keywords

CubeSat, transformable antenna, expandable antenna, parabolic antenna calculation, reflector, radio reflective surface, petalled antenna, umbrella antenna

For citation

Malygin I. V., Karamyshev A. S., Blinov S. S. The development of automatic expandable microwave antennas for CubeSat satellites. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(1):30–42. DOI: 10.15826/urej.2019.3.1.002

1. Введение

Создание больших космических конструкций сопряжено с решением ряда технических и механических проблем, обусловленных уникальностью объектов, характерной особенностью которых является сочетание противоречивых требований увеличения габаритных размеров и обеспечения достаточной жесткости при весьма ограниченной массе силового каркаса. Как правило, такие конструкции устанавливаются на космические орбиты в сложенном транспортном состоянии и дальнейшее приведение их в рабочее положение связано с реализацией процесса раскрытия. Реализация раскрытия трансформируемых систем связана с решением трудных задач механики конструкций, обеспечивающих необходимые рабочие характеристики проектируемых космических конструкций. Несмотря на достигнутые значительные успехи в области проектирования таких конструкций, важной остается задача обеспечения плавного и надежного раскрытия трансформируемых крупногабаритных конструкций, состоящих из нескольких взаимосвязанных между собой элементов, при гарантированном обеспечении их последующего функционирования [1].

Текущий уровень развития космических информационных систем связи привел к необходимости освоения диапазонов дециметровых и сантиметровых волн. Освоение данных частот также обусловлено тем, что частотный ресурс низких диапазонов к настоящему времени практически исчерпан. Системы связи, работающие в высоких диапазонах частот, способны более качественно решать обширный круг задач, актуальных в современном

мире. В основном это организация высокоскоростных каналов связи. Однако работа в высоких диапазонах частот накладывает ограничения на точность антенных систем, и в частности антенных рефлекторов. Также решение поставленных задач неразрывно связано с обеспечением узкой и стабильной диаграммы направленности космической антенной системы. А это, в свою очередь, подразумевает использование рефлектора больших габаритов, так как пропускная способность канала радиосвязи зависит от коэффициента усиления антенной системы, который напрямую связан с диаметром апертуры рефлектора. С другой стороны, размещение антенн большой апертуры на космическом аппарате невозможно ввиду ограниченности объема под головным обтекателем ракеты-носителя. Для решения данной проблемы широко используются трансформируемые антенны [2].

Трансформируемые антенны как класс антенн известны и исследованы достаточно подробно. В то же время трансформируемые антенны для спутников CubeSat не описаны и не применяются в текущих проектах. Действующие на данный момент спутники имеют монопольные/дипольные антенны ОВЧ- и УВЧ-диапазонов. Пример типовой антенны, используемой в спутнике FSpace F-1 CubeSat, показан на рис. 1. Благодаря использованию раскрываемых антенн и переходу на УВЧ- и СВЧ-диапазоны частот спутники CubeSat могут обрести более высокую скорость передачи данных. Высокая пропускная способность канала открывает новые возможности для использования спутников CubeSat.

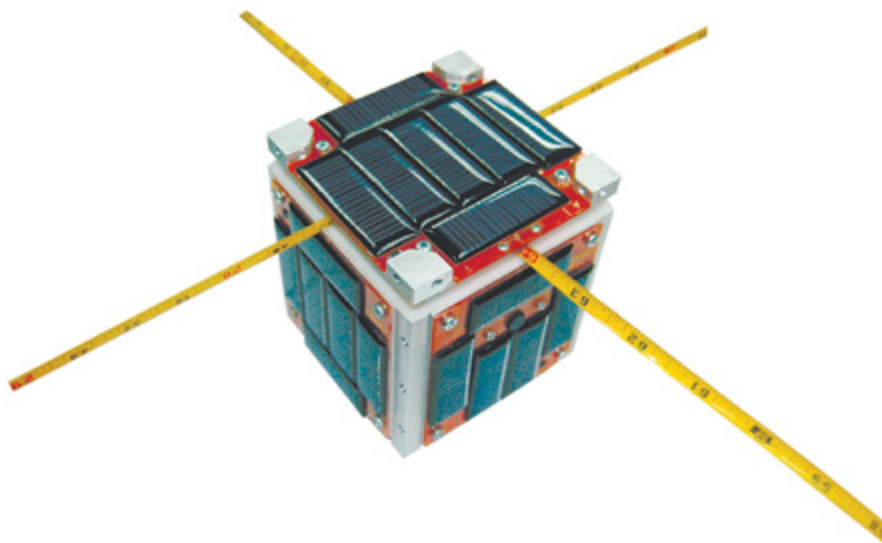


Рис. 1. Антенная система спутника FSpace F-1 CubeSat

Fig. 1. Satellite communication system of FSpace F-1 CubeSat

В данной работе проведено сравнение трансформируемых антенных и монополюсных/дипольных антенн для использования в качестве антенной системы по пропускной способности канала, описание известных типов раскрываемых антенн и оценка возможности их применения на спутниках CubeSat в качестве основной антенной системы. Также ведется разработка натуральных макетов, отражающих принципы приведения антенн в рабочее состояние.

2. Пропускная способность канала спутников CubeSat

Ниже приведена табл. 1 из [3], показывающая передатчики спутников CubeSat, запускаемых в 2009–2011 гг. Столбец 7 «Baud Rate/Modulation» показывает пропускную способность спутников. Как видно в таблице, при схожих показателях мощности и одинаковых диапазонах пропускная способность канала downlink не превышает 1,5 Mbps – показатель у спутников DICE-1 и DICE-2. Пропускная способность канала uplink также достаточно мала ввиду более низкой частоты и не превышает 19,2 kbps – показатель у спутников DICE-1 и DICE-2 [4].

При переходе на параболическую антенну повысится коэффициент усиления антенны. Исходя из формулы передачи Фрииса, можно утверждать, что увеличение коэффициента усиления антенны при прочих равных условиях дает возможность либо снизить мощность передатчика спутника, либо перейти в более высокий диапазон частот. Тем самым применение параболической антенны позволит использовать УВЧ- и СВЧ-диапазоны, что повысит пропускную способность канала. Также применение параболической антенны снизит мощности излучения передатчика CubeSat, что может увеличить срок службы спутника.

Формула передачи Фрииса:

$$\frac{P_{np}}{P_{nep}} = G_{np} G_{nep} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2,$$

где P_{np} – мощность на входе приемника [Вт]; P_{nep} – мощность на выходе передатчика [Вт]; G_{np} – коэффициент усиления приемной антенны; G_{nep} – коэффициент усиления передающей антенны; $\lambda = \frac{C}{f}$ – длина волны при заданной частоте передачи f [м], $C = 3 \cdot 10^8$ [м/с] – скорость света.

Для параболической антенны с круглой апертурой коэффициент усиления рассчитывается по формуле:

$$G_a = 10 \lg \left(k \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \cos(\Phi) \right),$$

Таблица 1. Передатчики Cubesat по дате запуска 2009–2011 гг.

Table 1. Cubesat transmitters by launch date 2009–2011

Launch Date/Location <i>1</i>	Satellite(s) <i>2</i>	Size <i>3</i>	Frequency <i>4</i>	Power <i>5</i>	Protocol <i>6</i>	Baud Rate/Modulation <i>7</i>
May 19, 2009 Minotaur-1 Wallops, US	PharnaSat CP6	3U	2.4 GHz	1 W	Proprietary	15 kbps
	HawkSat-I	1U	437 MHz	1 W	CC1000 AX.25	1200 baud AFSK
	AeroCube-3	3U	425 GHz	1 W	MHX-425 NSP	1200 baud AFSK
July 30, 2009 STS-127	Aggiesat-2	1U	900 MHz	2 W	Freewave FHSS	Proprietary
September 23, 2009	SwissCube	1U	436.25 MHz	1 W	AX.25	1200 baud AFSK
ISILaunch 01 India	ITUpSat1	1U	437.505 MHz	1 W	AX.25	1200 baud FSK
	UWE-2	1U	437.325 MHz	1 W	Custom	19.2 kbps GFSK
	BeeSat	1U	437.385 MHz	500 mW	AX.25	9600 bps FSK
May 20, 2010	Hayato (K-Sat)	1U	436 MHz	500 mW	AX.25	4800 and 9600 GMSK
Japanese H-IIA Japan	Waseda-Sat1	1U	13.275 GHz	Custom	Custom	10 kbps/1 Mbps
	Negai	1U	437.485 MHz	1 W	AX.25	9600 baud FSK
July 12, 2010	TISat-1	1U	427.305 MHz	1 W	AX.25	1200 FSK
PSLV-C15 India	StudSat	1U	437.305 MHz	400 mW	Custom CW	110 WPM
November 20, 2010	O/OREOS	1U	437.505 MHz	450 mW	AX.25	9600 baud FSK
STP-S26	RAX1	3U	437.305 MHz	1 W	AX.25	1200 FSK
Kodiak, Alaska	NanoSail-D2	3U	437.505 MHz / 2.4 GHz	2 W / 2 W	AX.25	9600 baud FSK
August 12, 2010	Perseus (4)	1.5U	437.275 MHz	1 W	AX.25	1200 baud FSK
Falcon 9-002	QbX (2)	3U	PI	PI	PI	PI
Capa Canaveral	SMD-CONE	3U	UHF	PI	PI	PI
	Mayflower	3U	437.600 MHz	900 mW	AX.25	1200 AFSK
March 4, 2011	E1P	1U	437.505 MHz	1 W	KISS/Custom	1200 FSK
Tarus XL Failure	Hermes	1U	2.4 GHz	1 W	MHX-2420	56.2 kbps
Vandenberg, CA	KySat	3U	436.790 MHz	1 W	AX.25	1200 FSK
Oct 12, 2011 India	JUGNU	3U	437.275 MHz	500 mW	CW	20 WPM
Oct 28, 2011	DICE-1/2	1.5U	460/465 MHz	2 W	PI	1.5 Mbps
Elana3	M-Cubed	1U	437.485 MHz	1 W	AX.25	9600 GMSK
Vanderburg, CA	RAX-2	3U	437.345 MHz / 2.4 GHz	2 W / 2 W	AX.25	9600 FSK
	E1P-2	1U	437.505 MHz	850 mW	AX.25	1200 FSK
	AubieSat-1	1U	437.475 MHz	708 mW	CW	20 WPM

Источник: [3]

где G_a – коэффициент усиления; k – эффективность или коэффициент использования поверхности антенны; D – диаметр зеркала [м]; λ – длина волны при заданной частоте передачи f [м], $C = 3 \cdot 10^8$ [м/с]; $\lambda = \frac{C}{f}$ – скорость света; Φ – угол прихода волны относительно фокальной оси антенны [рад].

При использовании одной из стандартных частот 2,4 ГГц (табл. 1), диаметра зеркала порядка 60 см и угла прихода волны 25 градусов при стандартном коэффициенте использования поверхности антенны 0,55 получим $G_a = 20,5$ дБ. Если учесть, что в силу трансформируемой конструкции точность параболы будет ниже, соответственно, и коэффициент усиления будет ниже. Но даже если полученный коэффициент усиления будет порядка 10 дБ, получим снижение мощности передачи примерно на порядок при тех же параметрах (по сравнению с полуволновым вибратором), либо соответствующее увеличение скорости передачи при той же мощности.

Для оценки коэффициента направленного действия (КНД) зеркальной антенны можно воспользоваться формулой:

$$\text{КНД} = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \gamma \exp \left[- \left(\frac{4\pi \bar{\Delta}}{\lambda} \right)^2 \right],$$

где D – диаметр зеркала [м]; λ – длина волны при заданной частоте передачи f [м], $C = 3 \cdot 10^8$ [м/с] – скорость света; γ – результирующий коэффициент использования облучателя и зеркала; $\bar{\Delta}^2$ – дисперсия отклонения профиля.

Если максимальное отклонение от профиля не превышает Δ_{\max} (допуск на профиль), то с вероятностью 99 % $\Delta_{\max} = 2,6 \Delta$. Величина

$$\exp \left[- \left(\frac{4\pi \bar{\Delta}}{\lambda} \right)^2 \right]$$

представляет собой ошибку по коэффициенту использования поверхности (КИП) антенны. При использовании частоты 2,4 ГГц, допуске на профиль $\Delta_{\max} = 5$ мм, то дополнительное снижение КНД

$$\exp \left[- \left(\frac{4\pi \bar{\Delta}}{\lambda} \right)^2 \right]$$

составит порядка 0,986. Можно сделать вывод о том, что при использовании лепестковой зеркальной антенны с достаточно большим допуском на частоте 2,4 ГГц ошибка по КИП такой антенны очень мала.

Минимальную рабочую частоту зеркала, как рефлектора, можно оценить по формуле:

$$\lambda = \frac{D}{3},$$

где D – диаметр зеркала [м]; $\lambda = \frac{C}{f}$ – длина волны при заданной частоте передачи f [м], $C = 3 \cdot 10^8$ [м/с] – скорость света [5].

На рабочей частоте 2,4 ГГц минимальный диаметр зеркала составляет 375 мм. В зависимости от конфигурации спутника CubeSat и полезной нагрузки диаметр зеркала антенны может быть больше. По предварительным оценкам можно обеспечить зеркало диаметром порядка 500 мм при конфигурации 3U.

3. Класс складывающихся (трансформируемых) антенн

Рефлекторы антенн больших диаметров, в связи с их размерами, не позволяют произвести их вывод на орбиту в рабочем положении. В следствие этого производится изменение размеров рефлекторов до приемлемых значений (так чтобы он помещался в зоне полезного груза) путем компактной укладки рефлекторной поверхности и ее фиксации в стартовом положении в течении всего периода выведения. Такие антенны называются складывающиеся (трансформируемые) антенны [6].

Складывающиеся (трансформируемые) антенны потребовали создания гибких радиоотражающих поверхностей с высоким (97 ... 99 %) коэффициентом радиоотражения в рабочем диапазоне частот, минимальным усилием растяжения, высокой стабильностью физико-механических и электрофизических характеристик при хранении и длительном сроке эксплуатации.

Самой большой точностью поверхности обладают неразворачиваемые антенны с жесткой отражающей поверхностью, но их размер ограничен размерами ракеты-носителя. Несколько больших размеров можно достичь, используя разворачиваемые конструкции с жесткой отражающей поверхностью. В настоящее время наиболее используемыми являются антенны с сетчатой радиоотражающей поверхностью, обладающие достаточно высокой точностью при больших размерах. Надувные конструкции антенн наименее точные, но могут достигать самых больших размеров [7].

Крупногабаритные космические антенны испытывают действие разнообразных нагрузок и температурных полей. К трансформируемым конструкциям предъявляют в первую очередь высокие требования по жесткости, обусловленные необходимостью ориентации антенны и обеспечением точности рабочей поверхности рефлектора. Антенны также должны обладать минимальной массой и объемом в сложенном положении, иметь высокую надежность разворачивания и сохранять свои параметры в процессе эксплуатации [6].

4. Семейство автоматических раскрываемых СВЧ антенн

Нами были исследованы возможные варианты трансформируемых антенн для спутников, а также специфика стандарта спутников CubeSat. Далее предлагается несколько вариантов раскрытия антенн.

4.1. Лепестковая антенна

Данная конструкция антенны состоит из нескольких составных частей в виде секторов. Каждая часть имеет усиленный каркас и отражающую поверхность. Раскрыв может осуществляться в двух вариантах:

а) в формате веера (каждая следующий лепесток наслаивается на другой);

б) в формате цветка (каждый лепесток раскрывается из центра наружу под углом, наслаиваясь на предыдущий).

Особенностями данного типа антенн является простота реализации, достаточная прочность конструкции и наибольшая точность параболической поверхности. К недостаткам можно отнести наименьшую эффективность в плане габаритов в свернутом состоянии, так как отдельно взятый лепесток невозможно хранить в более компактном состоянии [8]. Механизмы раскрытия изображены на рис. 2 и 3. Также было проведено натурное моделирование зеркала лепестковой антенны с целью предварительной оценки работы механизма раскрытия. Модель изображена на рис. 4.

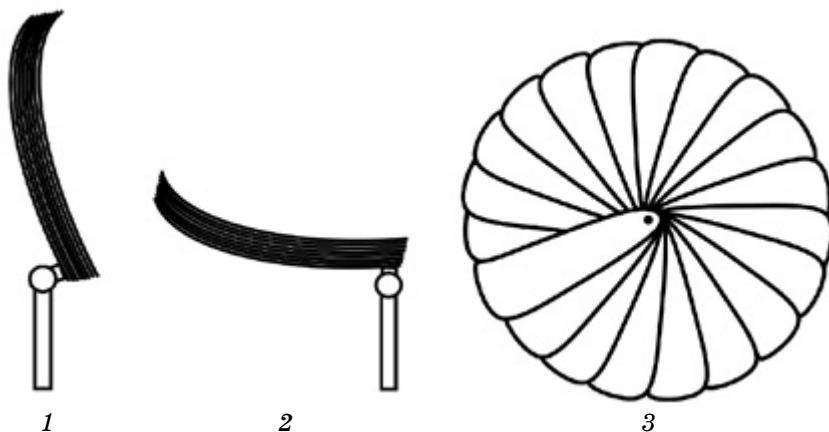


Рис. 2. Лепестковая антенна в формате веера (3 стадии раскрытия)

Fig. 2. Petal Antenna in the hand fan format (3 opening positions)

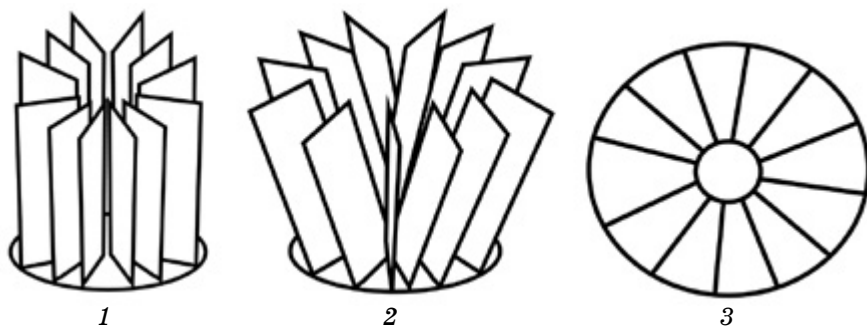


Рис. 3. Лепестковая антенна в формате цветка
(3 стадии раскрытия)

Fig. 3. Petal Antenna in the flower format
(3 opening positions)

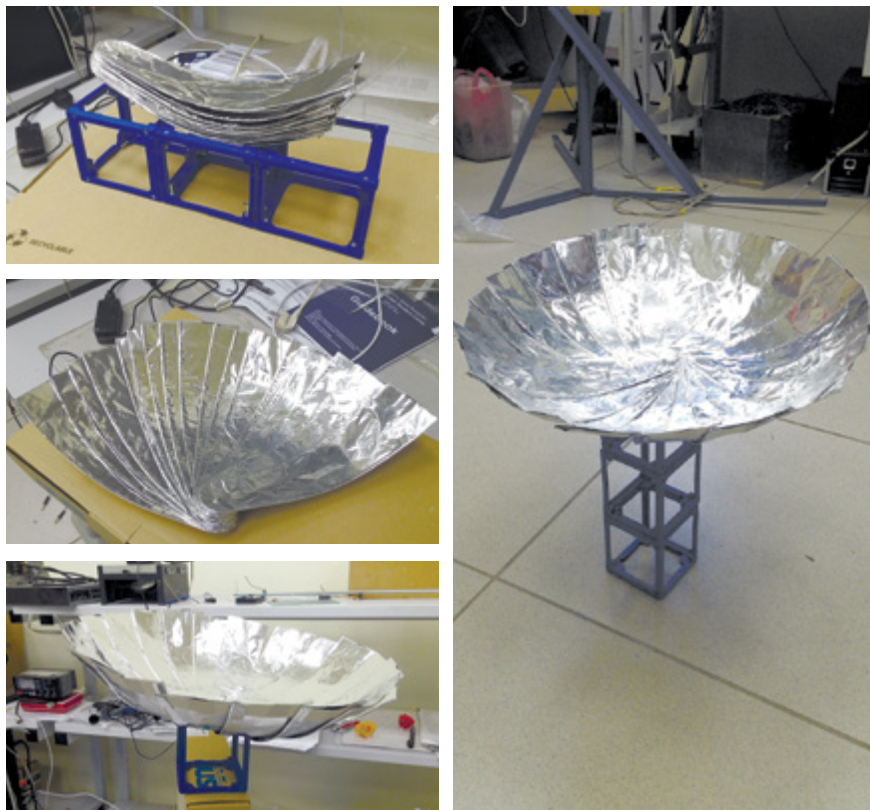


Рис. 4. Модель зеркала лепестковой антенны
в натуральную величину (3 стадии раскрытия)

Fig. 4. Full-size model of reflector of petal antenna
(3 opening positions)

4.2. Зонтичная антенна

Предложенная конструкция работает по принципу зонта от дождя. Антенна имеет несколько несущих для осуществления каркаса и придания необходимой формы, а также гибкий радиоотражающий материал, образующий при раскрытии поверхность рефлектора.

К преимуществам можно отнести достаточную компактность конструкции (при использовании нескольких колен в качестве опоры). Недостатком является использование в качестве отражающей поверхности гибкого материала, что не позволяет добиться точной желаемой формы отражающей поверхности. Механизм раскрытия изображен на рис. 3.

4.3. Антенна со свободно раскрываемым экраном

В данном типе раскрываемых антенн используются гибкие материалы как для несущих конструкций, так и для отражающей поверхности.

Преимуществом является максимальная компактность – всю конструкцию антенны можно уместить в достаточно малом объеме. К недостаткам можно отнести наименьшую равномерность отражающей антенны в раскрытом состоянии, так как используются полностью гибкие материалы [9]. Механизм раскрытия изображен на рис. 5.

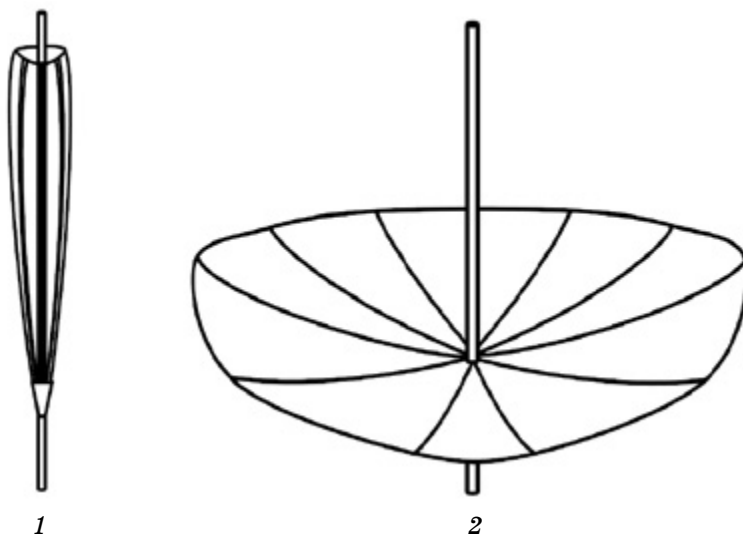


Рис. 5. Зонтичная антенна
(2 стадии раскрытия)

Fig. 5. Umbrella antenna
(2 opening positions)

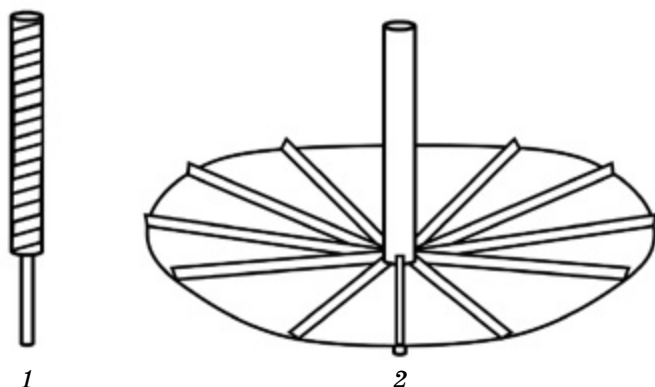


Рис. 6. Антенна со свободно раскрывающимся экраном
(2 стадии раскрытия)

Fig. 6. Antenna with a freely expandable screen
(2 opening positions)

5. Заключение

Исследование и разработка раскрываемых антенн является перспективной сферой развития антенных систем спутников CubeSat. Повышение пропускной способности канала приема/передачи спутника за счет применения раскрываемых параболических антенн позволит применять спутники в новых сферах. Также применив параболическую антенну на спутнике CubeSat, мы получим возможность снизить мощность излучения в несколько раз, что позволит либо увеличить срок службы спутника, либо взять на борт больше полезной нагрузки.

У трансформируемых антенн существуют ряд недостатков: сложность проектирования, более низкая точность по сравнению с неразворачиваемыми антеннами. Существует также проблема позиционирования таких антенных систем, которая не была рассмотрена в данной работе. Тем не менее данное техническое решение имеет место быть и применяться для решения новых задач. Например, для построения системы «Глобальный Интернет».

Список литературы

1. Зимин В. Н., Крылов А. В., Мешковский В. Е., Сдобников А. Н., Файзуллин Ф. Р., Чурилин С. А. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций. *Наука и Образование: Научное издание*. 2014;(10):179–191. DOI: 10.7463/1014.0728802
2. Литовка Д. А., Тайгин В. Б. Крупногабаритная прецизионная трансформируемая антенна на основе твердотельных отражательных

панелей. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева*. 2016;17(2):408–417.

3. Muri P., McNair J. A Survey of communication sub-systems for intersatellite linked systems and CubeSat missions. *Journal of Communications*. 2012;7(4):258–264. DOI: 10.4304/jcm.7.4.290-308

4. DICE (*Dynamic Ionosphere CubeSat Experiment*), DICE-1 and DICE-2. Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dice>

5. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. *Антенны*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия; 1975.

6. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (часть 1). *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева*. 2007;(2):51–57.

7. Лопатин А. В., Рутковская М. А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (часть 2). *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева*. 2007;(3):78–81.

8. Буякас В. И., Архипов М. Ю., Белов М. В., Матвеев С. В. *Технология 3D печати в задаче моделирования раскрытия большого космического зеркала*. Режим доступа: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2010/2/38.htm>

9. Буякас В. И., Троицкий В. Ф., Шаенко А. Ю., Гордиенко А. М., Гришин Н. С., Синельников Е. Н. *Моделирование задач укладки и раскрытия радиационных экранов большого космического телескопа*. Режим доступа: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2008/4/9..htm>

References

1. Zimin V. N., Krylov A. V., Meshkovskii V. E., Sdobnikov A. N., Fayzullin F. R., Churilin S. A. Features of the Calculation Deployment Large Transformable Structures of Different Configurations. *Science and Education: Scientific Publication*. 2014;(10):179–191. (In Russ.) DOI: 10.7463/1014.0728802

2. Litovka D. A., Taygin V. B. Large transformable precision antenna based on solid reflecting panels. *Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*. 2016;17(2):408–417. (In Russ.)

3. Muri P., McNair J. A Survey of communication sub-systems for intersatellite linked systems and CubeSat missions. *Journal of Communications*. 2012;7(4):258–264. DOI: 10.4304/jcm.7.4.290-308

4. DICE (*Dynamic Ionosphere CubeSat Experiment*), DICE-1 and DICE-2. Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dice>

5. Markov G. T., Sazonov D. M. *Antennas*. 2nd ed. Moscow: Energy; 1975. (In Russ.)

6. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. The Review of designs of modern transformed space antennas (part 1). *Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*. 2007;(2):51–57. (In Russ.)

7. Lopatin A. V., Rutkovskaya M. A. The Review of designs of modern transformed space antennas (part 1). *Vestnik SibSAU. Aerospace technologies and control systems*. 2007;(3):78–81.

8. Buyakas V. I., Arkhipov M. Yu., Belov M. V., Matveev S. V. *Technology of 3D printing in the problem of modeling the disclosure of a large cosmic mirror*. Available at: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2010/2/38.htm>

9. Buyakas V. I., Troitsky V. F., Shayenko A. Yu., Gordienko A. M., Grishin N. S., Sinelnikov E. N. *Simulation of the problems of stacking and opening the radiation screens of a large space telescope*. Available at: <http://lab18.ipu.ru/projects/conf2008/4/9..htm>

Информация об авторах

Малыгин Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент департамента радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620078, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32); e-mail: i.v.malygin@urfu.ru.

Карамышев Алексей Сергеевич – магистр департамента радиоэлектроники и связи в Институте радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620078, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32); e-mail: askaramysh@yandex.ru.

Блинов Сергей Сергеевич – магистр департамента радиоэлектроники и связи в Институте радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (620078, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32); e-mail: sergey.s.blinov@ya.ru.

Information about the authors

Ivan V. Malygin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Communications of the Institute of Radio Electronics and Information Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: i.v.malygin@urfu.ru.

Alexey S. Karamyshev – Postgraduate student of the Department of Radio Electronics and Communications of the Institute of Radio Electronics and Information Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: askaramysh@yandex.ru.

Sergey S. Blinov – postgraduate student of the Department of Radio Electronics and Communications of the Institute of Radio Electronics and Information Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (32, Mira St., 620078, Ekaterinburg, Russia); e-mail: sergey.s.blinov@ya.ru.

Поступила / Received: 10.12.2018

Принята в печать / Accepted: 14.02.2019